

## Wirtschaftlich optimale Wärmedämmung von Biogasanlagen

Von Gerhard Englert, Freising-Weihenstephan\*)

DK 631.862:662.767.1:699.86

Die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen hängt sehr stark auch davon ab, welche Wärmeenergie — z.B. durch Verbrennen eines Teiles der erzeugten Gasmenge — aufzubringen ist, um die Temperatur im Biogasreaktor konstant zu halten. Die erforderliche Wärmeenergie läßt sich verringern, wenn man die Wärmedämmung des Reaktors verbessert. Es stellt sich dabei die Frage, welche Dämmschichtdicken wirtschaftlich optimal sind.

Das für die Berechnung der jährlichen Wärmeabgabe an die Außenluft bzw. der optimalen Wärmedämmung im Wohnungsbau übliche Verfahren, im Schrifttum niedergelegte Werte der "Heizgradtage" einzusetzen, ist hier wegen der höheren Innentemperatur nicht anwendbar. Die Berechnung der optimalen Dämmschichtdicke unter Berücksichtigung des spezifischen Investitionsaufwandes für den Dämmstoff, des Energiepreises, der Energiepreissteigerungsrate sowie der Nutzungsdauer der Dämmkonstruktion wird daher mit Hilfe von Häufigkeitsverteilungen der Außenluft durchgeführt.

### 1. Einleitung

Bei der, mit den steigenden Energiepreisen wieder interessant gewordenen Biogasgewinnung spielt die Prozeßtemperatur eine wesentliche Rolle. Die anaerobe Vergärung der organischen Substanzen hat, je nachdem welche Bakterienstämme für den Gärprozeß verantwortlich sind, verschiedene hinsichtlich der Gasausbeute optimale Temperaturbereiche [1]. Für den Betrieb von Biogasanlagen werden dementsprechend folgende Prozeßtemperaturen angegeben [2]:

psychrophile Vergärung	15 °C
mesophile Vergärung	35 °C
thermophile Vergärung	55 °C.

Die mesophile und thermophile Vergärung erfordern damit das ganze Jahr über, die psychrophile Vergärung während des größten Teiles des Jahres eine Zufuhr von Wärmeenergie, damit der Transmissionswärme-Verlust über die Wand des Biogasreaktors ausgeglichen und die Prozeßtemperatur konstant gehalten werden kann.

Statt nun Wärmeenergie zuzuführen, z.B. durch Verbrennen eines Teiles der erzeugten Methangasmenge, läßt sich der Wärmehaushalt des Biogasreaktors auch über die Wärmedämmung der Behälterwand verbessern. Dafür ist eine Investition erforderlich und es fragt sich, welcher Investitionsaufwand, d.h. aber welcher k-Wert der Dämmung und welche Dämmschichtdicke wirtschaftlich sinnvoll sind. Man kommt so zu der Aufgabe, die Wärmedämmung des Biogasreaktors wirtschaftlich zu optimieren.

Wirtschaftlichkeitsberechnungen zur Wärmedämmung von Biogasreaktoren wurden bisher nur für Einzelobjekte durchgeführt (z.B. [2]). Da sich das Problem, den wirtschaftlich optimalen k-Wert für einen Raum zu bestimmen, wenn der Ausgleich seines Wärmehaushaltes über eine Heizung sowie über die Wärmedämmung der Raumhülle möglich ist, im Hochbau in gleicher Weise stellt und einschlägige Veröffentlichungen die Lösung dieses Problems beschreiben (z.B. [3 bis 5]), lassen sich die im Hochbau angewandten Rechenverfahren auf Biogasanlagen übertragen. Von den verschiedenen Möglichkeiten der wirtschaftlichen Optimierung [4] wird dazu die Methode der Minimierung der durchschnittlichen Jahreskosten übernommen, da Landwirte bei Investitionen in bauliche Anlagen nur selten auf maximale Rentabilität oder gar auf eine optimale Energieausnutzung [4] achten.

Das im Hochbau zur Berechnung der Transmissionswärme-Verluste verwendete Verfahren unter Benutzung von gegebenen Werten der Heizgradtage [5] mußte dabei modifiziert werden. Diese Zahlenwerte beziehen sich auf eine Raumtemperatur von 20 °C und lassen sich nur für Temperaturen unter 20 °C anpassen [6]. Um auch die Wärmeverluste bei den Reaktortemperaturen der meso- und thermophilen Vergärung berechnen zu können, wurden entsprechende Zahlenwerte der Heizgradtage bzw. -stunden über Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur für die Orte Oberstdorf, München und Hamburg ermittelt. Damit können dann der optimale k-Wert und die entsprechende Dämmschichtdicke aus analytischen Beziehungen berechnet werden. Mit diesen wird schließlich gezeigt, in welcher Weise sich Einflußgrößen wie der spezifische Investitionsaufwand für die Dämmstoffe oder die Lebensdauer der Dämmkonstruktion auf die Kennwerte der wirtschaftlich optimalen Wärmedämmung auswirken.

\*) *Dipl.-Phys. Dr. G. Englert ist Akademischer Oberrat an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik.*

## 2. Rechenverfahren für die wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Biogasanlagen

### 2.1 Zusammensetzung der Jahresgesamtkosten

Die für die Beeinflussung des Wärmehaushaltes eines Biogasreaktors sich anbietenden technischen Maßnahmen Heizung und Wärmedämmung sind mit einem einmaligen Investitionsaufwand für den Kauf und die Installation sowie mit laufend anfallenden Kosten für die Instandhaltung und, bei der Heizung, für die Betriebsstoffe (z.B. Methangas oder Heizöl) verbunden. Betrachtet man diese durchschnittlichen Jahreskosten als eine Annuität (jährliche Tilgungsrate und Zinsleistung), so lassen sich über deren Kapitalwert die durchschnittlichen jährlichen Gesamtkosten  $\dot{K}_{\text{ges}}$  folgendermaßen angeben [3]:

$$\dot{K}_{\text{ges}} = (K_{I,WD} + K_{I,H}) a_N + (\dot{K}_{W,WD} + \dot{K}_{W,H} + \dot{K}_B) \quad (1)$$

mit

$$a_N = \frac{\gamma(q/\gamma)^N (q/\gamma - 1)}{(q/\gamma)^N - 1}; \quad \gamma = 1 + j; \quad q = 1 + i \quad (2),$$

darin ist:

$K_{I,WD(H)}$	Kosten der Investitionen für die Wärmedämmung (WD) bzw. Heizung (H) (DM)
$\dot{K}_{W,WD(H)}$	durchschnittliche jährliche Kosten der Wartung und Instandhaltung für die Wärmedämmung (WD) bzw. Heizung (H) (DM/Jahr)
$\dot{K}_B$	jährliche Kosten für die Betriebsstoffe, mit denen der Wärmehaushalt über die Heizung ausgeglichen wird (DM/Jahr)
$a_N$	Annuitätenfaktor (%/Jahr)
$\gamma$	Energiepreissteigerungsfaktor (%/Jahr)
$j$	jährliche Energiepreissteigerung (%/Jahr)
$q$	Zinsfaktor (%/Jahr)
$i$	Zinssatz (%/Jahr)
$N$	Betrachtungszeitraum, Nutzungsdauer (Jahre)

### 2.2 Investitionsaufwand der Wärmedämmung

Der für die Wärmedämmkonstruktion erforderliche Investitionsaufwand  $K_{I,WD}$  läßt sich folgendermaßen erfassen [7]:

$$K_{I,WD} = AK_{I,WD}^* + As K_{I,WD}^{**} \quad (3),$$

mit

$A$	Fläche der Raumhülle ( $m^2$ )
$s$	Dämmschichtdicke (m)
$K_{I,WD}^*$	flächenbezogener Preis der für die Dämmkonstruktion zusätzlich benötigten Baustoffe (z.B. für die Außenverkleidung) und für den Arbeitsaufwand (DM/ $m^2$ )
$K_{I,WD}^{**}$	volumenbezogener Preis des Wärmedämmstoffes (DM/ $m^3$ ).

Aus der Definition des den Wärmestrom durch die Raumhülle kennzeichnenden Wärmedurchgangskoeffizienten folgt:

$$s = \lambda \left( \frac{1}{k} - \frac{1}{k_0} \right) \quad (4)$$

und damit für Gl. (3):

$$K_{I,WD} = AK_{I,WD}^* + AK_{I,WD}^{**} \lambda \left( \frac{1}{k} - \frac{1}{k_0} \right) \quad (5),$$

worin ist

$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffes (W/mK)
$k$	Wärmedurchgangskoeffizient (W/ $m^2K$ )
$k_0$	Wärmedurchgangskoeffizient der ursprünglichen Lösung (W/ $m^2K$ ).

### 2.3 Transmissionswärmeverluste

Die über die Reaktorwand jährlich abfließende Wärmeenergie, der Transmissionswärmeverlust  $\dot{Q}_T$  (in Wh/Jahr), errechnet sich für den stationären Fall zu:

$$\dot{Q}_T = A k (\vartheta_i - \vartheta_a) t = A k \Delta\vartheta t \quad (6),$$

mit

$\vartheta_i$	Reaktortemperatur (°C)
$\vartheta_a$	Außentemperatur (°C)
$t$	Zeit, in der der Wärmestrom fließt (h/Jahr).

In Wirklichkeit sind instationäre Verhältnisse gegeben, weil sich die Außentemperatur ändert. Anstelle des Produktes  $\Delta\vartheta t$  mit konstantem  $\Delta\vartheta$  ist daher die Summe aller Produkte aus der jeweiligen Temperaturdifferenz und der zugehörigen Zeitspanne einzusetzen, eine Größe, die je nach der gewählten Zeiteinheit als "Heizgradstunden" (in K h/Jahr) oder "Heizgradtage" (K d/Jahr) benannt wird. Es gilt:

$$\sum_n (\Delta\vartheta_n t_n) = \Delta\vartheta_m z 24 = 24 G_t = G_h \quad (7),$$

mit

$\Delta\vartheta_m$	mittlere Temperaturdifferenz während der Heizzeit (°C)
$z$	Zahl der Heiztage (d/Jahr)
$G_t$	Heizgradtage (K d/Jahr)
$G_h$	Heizgradstunden (K h/Jahr).

Werte für die Heizgradtage einzelner Orte können aus Tafeln (z.B. [6]) entnommen werden. Sie beziehen sich auf eine Raumtemperatur von 20 °C. Für Temperaturen unter 20 °C lassen sich die entsprechenden Werte mit Umrechnungsfaktoren ermitteln.

### 2.4 Ermittlung von Heizgradstunden für Biogasanlagen

Um auch die Wärmeenergieverluste bei den Prozeßtemperaturen der mesophilen und thermophilen Vergärung mit Heizgradstunden berechnen zu können, wurden entsprechende Zahlenwerte mit Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur in folgender Weise errechnet (s. auch [8]):

$$G_h(\vartheta_i) = \sum_n t(\vartheta_{a,n}) \left[ \vartheta_i - \frac{1}{2} (\vartheta_{a,n} + \vartheta_{a,n+1}) \right] \quad (8),$$

hierin ist

$n$	= 0, 1, ... m
$\vartheta_{a,n+1}$	= $\vartheta_{a,n} + \Delta\vartheta$
$\Delta\vartheta$	Klassenbreite der Häufigkeitsverteilung
$t(\vartheta_{a,n})$	Zahl der Stunden im Jahr mit einer Außentemperatur im Bereich $\vartheta_{a,n} \leq \vartheta_a \leq \vartheta_{a,n+1}$
$\vartheta_{a,n=0}$	untere Grenztemperatur mit $t(\vartheta_{a,0}) = 0$
$\vartheta_{a,n=m}$	obere Grenztemperatur mit $\vartheta_{a,m+1} = \vartheta_i$ oder mit $t(\vartheta_{a,m}) = 0$
$G_h(\vartheta_i)$	Heizgradstunden für die Reaktortemperatur $\vartheta_i$ im Zeitraum, den die Häufigkeitsverteilung beschreibt (K h/Jahr).

Das mit Gl. (8) beschriebene Rechenverfahren setzt voraus, daß sich der Wärmestrom ohne zeitliche Verzögerung mit der Außentemperatur ändert. Die gleiche Annahme wird auch bei der Berechnung der Heizgradtage für eine Raumtemperatur von 20 °C gemacht [6]. Da aber der Wärmestrom wegen der Wärmekapazität der Baustoffe in der Raumhülle eine je nach Ausführung der Raumhülle unterschiedlich große Dämpfung und Phasenverschiebung erfährt, können die Heizgradtage bzw. Heizgradstunden die Verhältnisse in der Praxis nur angenähert charakterisieren. Es gibt allerdings Hinweise, daß sich diese Trägheitseffekte über längere Zeiten hinweg ausmitteln [8].

Für die Berechnung der Heizgradstunden für Biogasreaktoren standen die in [8] vorgestellten Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur für die Orte Oberstdorf, München und Hamburg zur

Verfügung. Diese Verteilungen geben die durchschnittliche Häufigkeit (Zahl der Stunden pro Jahr) der Außentemperatur an, so daß sich die mit Gl. (8) errechneten Heizgradstunden ebenfalls auf ein Jahr beziehen. Die für die Prozeßtemperaturen 15 °C, 35 °C und 55 °C ermittelten Heizgradstunden sind in **Tafel 1** zusammengestellt. Ein Vergleich mit den Werten, die aus den tabellierten Heizgradtagen für München (3 600 K d/Jahr) und Hamburg (3 400 K d/Jahr) für die Reaktortemperatur von 15 °C errechnet wurden (letzte Spalte der Tafel) zeigt eine gute Übereinstimmung.

Standort	berechnet nach Gl. (8) $\vartheta_i$			berechnet für 15 °C aus tabellierten Heizgradtagen
	15 °C	35 °C	55 °C	
Oberstdorf	84 720	254 010	429 370	—
München	69 890	232 690	411 990	72 580
Hamburg	64 900	233 680	409 030	69 140

Tafel 1. Heizgradstunden (in K h/Jahr) für Biogasreaktoren mit unterschiedlicher Prozeßtemperatur  $\vartheta_i$ .

## 2.5 Jahreskosten für den Betriebsstoff der Heizung

Die von der Heizung des Biogasreaktors zu erzeugende Wärmeenergie muß, sieht man von einer Wärmezufuhr durch den Prozeß selbst ab, den Transmissionswärmeverlust ausgleichen. Die durchschnittlichen Jahreskosten für den Betriebsstoff der Heizung errechnen sich damit aus den Gln. (6) und (7) zu:

$$\dot{K}_B = \dot{Q}_T K'_E = A k G_h K'_E \quad (9)$$

mit  
 $K'_E$  Energiepreis (DM/Wh).

Der Energiepreis läßt sich aus dem Brennstoffpreis nach folgender Beziehung berechnen (s. [5] und [9])

$$K'_E = 3,6 \frac{K'_B}{\eta H_U} \quad (10)$$

$K'_B$  Preis für eine Brennstoffeinheit (z.B. DM/l)  
 $H_U$  Heizwert der Brennstoffeinheit (z.B. kJ/l)  
 $\eta$  Gesamtwirkungsgrad der Heizungsanlage

## 2.6 Wirtschaftlich optimale Wärmedämmung

Für die in Gl. (1) angegebenen Jahresgesamtkosten ergibt sich mit Gln. (5) und (9):

$$\dot{K}_{ges} = [A K_{I,WD}^* + A K_{I,WD}^{**} \lambda (\frac{1}{k} - \frac{1}{k_0})] a_N + K_{I,H} a_N + \dot{K}_{W,WD} + \dot{K}_{W,H} + A G_h K'_E k \quad (11)$$

Der Investitionsaufwand für die Heizung und die Jahreskosten für Wartung und Instandhaltung  $\dot{K}_{W,WD}$  bzw.  $\dot{K}_{W,H}$  sind hiernach vom k-Wert unabhängig.

Da die wirtschaftlich optimale Wärmedämmung aus den minimalen Jahresgesamtkosten ermittelt werden soll, lautet die Optimierungsbedingung:

$$\frac{d(\dot{K}_{ges})}{dk} = 0$$

Aus der 1. Ableitung der Gl. (11) nach k folgt der den minimalen Jahreskosten zugeordnete wirtschaftlich optimale k-Wert:

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{\lambda K_{I,WD}^{**} a_N}{G_h K'_E}} \quad (12)$$

Die entsprechende optimale Dämmschichtdicke errechnet sich über Gl. (4) zu

$$s_{opt} = \sqrt{\frac{\lambda G_h K'_E}{K_{I,WD}^{**} a_N} - \frac{\lambda}{k_0}} \quad (13)$$

Die Kennwerte der wirtschaftlich optimalen Wärmedämmung werden damit von folgenden Bestimmungsgrößen festgelegt:

Wärmeleitfähigkeit und volumenbezogener Preis des Wärmedämmstoffes, Zins- und Energiepreissteigerungsfaktor sowie Nutzungsdauer, Energiepreis und Heizgradstunden des Standortes der Biogasanlage.

Bemerkenswert ist, daß der optimale k-Wert und die entsprechende Dämmschichtdicke von der Größe der Wandfläche des Biogasreaktors unabhängig sind.

Die folgende Analyse dient dazu, das Ausmaß der Beeinflussung durch diese Bestimmungsgrößen darzustellen.

## 3. Abhängigkeit der Kenngrößen für die wirtschaftlich optimale Wärmedämmung von den Bestimmungsgrößen

### 3.1 Wärmeleitfähigkeit, volumenbezogener Dämmstoffpreis, Energiepreis, Heizgradstunden

Der in Gln. (12) und (13) beschriebene Einfluß der baustoffspezifischen Größen  $\lambda$ -Wert und volumenbezogener Dämmstoffpreis sowie des Energiepreises und der standortabhängigen Heizgradstunden auf den optimalen k-Wert und die optimale Dämmschichtdicke läßt sich vergleichbarer machen und verdeutlichen, wenn man die mit den Bestimmungsgrößen F geänderten  $k_{opt}$ - und  $s_{opt}$ -Werte auf ihre Werte bei den Ausgangswerten  $F_0$  der Bestimmungsgrößen bezieht. Es gilt nach Gl. (13):

$$\frac{k_{opt}(F_i = n F_{oi})}{k_{opt}(F_{oi})} = \sqrt{n} \quad \text{für } F = \lambda, K_{I,WD}^{**}$$

$$\sqrt{\frac{1}{n}} \quad \text{für } F = K'_E, G_h \quad (14)$$

$\lambda$  und  $K_{I,WD}^{**}$  wirken sich also in gleicher Weise auf  $k_{opt}$  aus, ebenso  $K'_E$  und  $G_h$ . Eine Verdoppelung des volumenbezogenen Preises oder  $\lambda$ -Wertes führt zu einem um den Faktor  $\sqrt{2} = 1,41$  vergrößerten optimalen k-Wert, während sich für einen doppelt so hohen Energiepreis oder Wert der Heizgradstunden ein  $k_{opt}$ -Wert in Höhe des  $\sqrt{1/2} = 0,71$ fachen des Ausgangswertes errechnet.

Für die optimale Dämmschichtdicke läßt sich eine ähnliche Vergleichsbasis schaffen, wenn man die auf der rechten Seite von Gl. (13) stehende Größe  $\lambda/k_0$  als Ausgangs-Dämmschichtdicke  $s_0$  interpretiert und zu  $s_{opt}$  addiert.

Für

$$s_{opt,ges} = s_{opt} + s_0$$

folgt dann

$$\frac{s_{opt,ges}(F = n F_0)}{s_{opt,ges}(F_0)} = \sqrt{\frac{1}{n}} \quad \text{für } F = K_{I,WD}^{**}$$

$$= \sqrt{n} \quad \text{für } F = K'_E, G_h \quad (15)$$

Diese vereinfachte Darstellung ist für die Untersuchung des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit nicht möglich, da die Ausgangs-Dämmschichtdicke von der Wärmeleitfähigkeit abhängt.

Wie stark sich die Unterschiede in den Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur für verschiedene Standorte in Deutschland auf die optimalen Dämmschichtdicken auswirken, läßt sich über

Gl. (15) und mit den Werten der Tafel 1 zeigen. So gibt Tafel 2 zum Vergleich mit dem Standort München die optimalen Dämmschichtdicken als Verhältniszahlen an.

Die Unterschiede in der Außentemperatur machen sich danach mit steigender Reaktortemperatur immer weniger bemerkbar.

Standort	$\vartheta_i$		
	15 °C	35 °C	55 °C
Oberstdorf	1,10	1,04	1,02
Hamburg	0,96	1,00	1,00

Tafel 2. Optimale Dämmschichtdicke an verschiedenen Standorten bei unterschiedlicher Reaktortemperatur  $\vartheta_i$ ; angegeben als Verhältniszahl  $s_{\text{opt,ges}}(\text{Standort})/s_{\text{opt,ges}}(\text{München})$ .

### 3.2 Energiepreissteigerung, Nutzungsdauer

Der Einfluß der Energiepreissteigerung und der Nutzungsdauer auf die optimale Dämmschichtdicke wurde für den gerade auch zur Wärmedämmung von Biogasreaktoren sehr gut geeigneten Wärmedämmstoff Polystyrol-Extruderschaum nach Gl. (13) berechnet und in Bild 1 dargestellt. Die übrigen Bestimmungsgrößen der Gl. (13) haben dabei folgende Rechenwerte:

$$\begin{aligned}
 K_{I,WD}^{**} &= 460 \text{ DM/m}^3 & K'_E &= 7 \cdot 10^{-5} \text{ DM/Wh} \\
 \lambda &= 0,035 \text{ W/m K} & k_0 &= 23 \text{ W/m}^2 \text{ K} \text{ Rechenwert} \\
 i &= 5 \% & & \text{für den Wärmeübergangskoeffizienten im Freien.}
 \end{aligned}$$

Aus Bild 1 läßt sich z.B. ablesen, daß bei der in der heutigen Zeit durchaus realistischen jährlichen Energiepreissteigerung  $j = 20\%$  schon bei einer Nutzungsdauer von 10 Jahren 15 cm Polystyrol-Extruderschaum wirtschaftlich optimal sind. Bei der sicherlich gegebenen Lebensdauer von 20 Jahren kommt man sogar auf 33 cm Dämmschichtdicke.

Bei einer kritischen Betrachtung dieser Ergebnisse ist allerdings zu beachten, daß eine Verdoppelung der optimalen Dämmschichtdicke auch einen doppelt so großen Investitionsbetrag für den Wärmedämmstoff erfordert. Dieser steht nicht immer zur Verfügung.

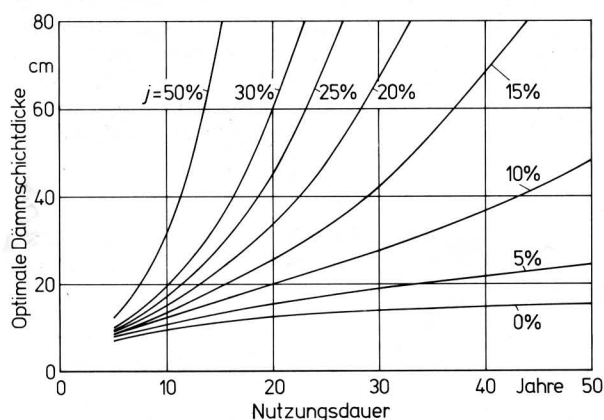


Bild 1. Wirtschaftlich optimale Dämmschichtdicke für Polystyrol-Extruderschaum in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer mit der jährlichen Energiepreissteigerungsrate  $j$  als Parameter.

## 4. Zusammenfassung

Die Prozeßtemperatur hat für den wirtschaftlichen Betrieb von Biogasanlagen eine wesentliche Bedeutung. Es ist dabei sehr wichtig, daß die als optimal erkannten Temperaturen von 15 °C, 35 °C oder 55 °C möglichst genau eingehalten werden. Dies erfordert eine ausgeglichene Wärmebilanz, wozu, wenn man die Wärmezufuhr durch den Prozeß vernachlässigt, die über die Reaktorwand abfließende Transmissionswärme durch eine entsprechend große Wärmezufuhr über eine Heizung zu ersetzen ist. Die Transmissionswärmeverluste lassen sich mit einer verbesserten Wärmedämmung verkleinern; der dafür erforderliche Investitionsaufwand führt dann zu einer Verminderung der jährlichen Heizkosten. Es stellt sich dabei die Frage, welcher Investitionsbetrag, d.h. aber welcher k-Wert der Reaktorwand bzw. welche zusätzliche Dämmschichtdicke wirtschaftlich optimal sind.

Zur Lösung dieses Problems, die Wärmedämmung von Biogasanlagen wirtschaftlich optimieren zu müssen, wird ein Optimierungsverfahren herangezogen, das auf einer Minimierung der jährlichen Gesamtkosten für die Investitionen zur Wärmedämmung und für den Ausgleich des verbleibenden Wärmebilanzdefizites beruht und das für den Wohnungs- und Industriebau entwickelt wurde. Da die Prozeßtemperaturen in Biogasreaktoren nicht mit der im Wohnungsbau als Rechenwert benutzten Raumtemperatur von 20 °C übereinstimmen, mußten dabei zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste spezielle Werte der Heizgradstunden für Biogasreaktoren über Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur ermittelt werden. Diese sind dann Bestimmungsgrößen der abgeleiteten Gleichungen für den wirtschaftlich optimalen k-Wert und für die entsprechenden Dämmschichtdicken.

Anhand dieser Gleichungen wird dargestellt, in welcher Weise sich die einzelnen Bestimmungsgrößen auf die Kenngrößen der wirtschaftlich optimalen Wärmedämmung auswirken.

### Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] • *Kaltwasser, B.J.:* Biogas. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag 1980.
- [ 2 ] *Perwanger, A.:* Erste Erfahrungen bei Betrieb und Wirtschaftlichkeit neuer Biogasanlagen. Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan (1981) Nr. 2, S. 48 ff.
- [ 3 ] *Werner, H. u. K. Gertis:* Zur Wahl der Kalkulationsmethoden bei der Ermittlung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen. Baumaschinen + Bautechnik Bd. 26 (1979) Nr. 2, S. 65/72.
- [ 4 ] *Werner, H.:* Methoden zur wirtschaftlichen Optimierung von Wärmedämm-Maßnahmen. Bauphysik Bd. 2 (1980) Nr. 5, S. 167/69.
- [ 5 ] *Berber, J.:* Wirtschaftlich optimaler Wärmeschutz. Heiz.-Lüft.-Klimatechn.-Haustechn. (HLH) Bd. 29 (1978) Nr. 10, S. 389/92.
- [ 6 ] • *Cammerer, J.S.:* Tabellarium aller wichtigen Größen für den Wärme- und Kälteschutz. Mannheim: VKI-Rheinhold + Mahla 1973, S. 318/19.
- [ 7 ] *Englert, G.:* Zur Berechnung minimaler Investitionen für die Wärmedämmung. Bauphysik Bd. 2 (1980) Nr. 6, S. 213/17..
- [ 8 ] *Englert, G.:* Ein Rechenmodell für die Wärmeenergiebilanz von Ställen. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 5, S. 170/74.
- [ 9 ] *Nil, K.:* Die Wirtschaftlichkeit einer nachträglichen Gebäudeisolierung. Klima u. Kälte-Ing. (K) Bd. 8 (1980) Nr. 2, S. 59/60.